



田伟,中国工程院院士,北京积水潭医院首席科学家。北京大学及清华大学教授,法国国家医学科学院外籍院士,英国爱丁堡皇家外科学院名誉院士,北京学者。第十八届国际计算机辅助骨科学会主席,中国科学技术期刊编辑学会理事长。国家手术机器人临床应用管理专家委员会主任委员。第十届中华医学会骨科学分会主任委员。中国医师协会医学机器人分会会长。

长期致力于骨科诊疗精准化、微创化、智能化研究应用,是我国骨科手术导航机器人领域的奠基者和开拓者。主持制定国际指南1项、国家卫生行业标准3项、国内指南5项。先后主持国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划等37项。发表论文400余篇。获美国产品注册证FDA 1项、中国产品注册证CFDA 3项。获国际专利4项、国内发明专利15项、实用新型专利230项。以第一完成人获国家科技进步二等奖1项、北京市科学技术一等奖2项。获何梁何利奖,全国创新争先奖奖章。

中国骨科手术机器人的发展

田伟,范明星,张琦,吴佳源,李楠

(北京积水潭医院脊柱外科 骨科机器人技术北京市重点实验室,100035 北京)

摘　要:目的　研究中国骨科手术机器人发展现状,并对未来进行展望。**方法**　本研究从中国骨科手术机器人的发展入手,回顾20余年的发展历史,根据骨科手术机器人在脊柱、关节、创伤等不同骨科领域的应用,介绍发展现状,并根据骨科医疗对手术机器人的需求及行业发展特点及对未来进行展望。**结果**　骨科手术机器人作为新型高端医疗设备,可以协助医生准确、安全的完成手术。未来要继续提升骨科手术机器人的自动化程度,实现从功能辅助到相对自主,从而进一步提高临床应用效果。**结论**　骨科手术机器人可以超越医生的部分手术技能,实现良好的临床应用效果,未来将是医生和机器人深度合作解决患者疾患的新时代。

关键词:手术机器人;脊柱;关节;创伤

中图分类号:R318　　　　**文献标志码:**A

收稿日期:2022-09-24　　　**修回日期:**2022-11-04

基金项目:北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金资助项目(No. L212062);北京市医院管理中心创新梦工场经费资助项目(No. 202109);北京积水潭医院学科新星资助项目(No. XKXX202104)

通信作者:田伟,教授,博士生导师。E-mail:tianwei_victor@163.com

引用格式:田伟,范明星,张琦,等.中国骨科手术机器人的发展[J].应用力学学报,2023,40(1):1-6.

TIAN Wei, FAN Mingxing, ZHANG Qi, et al. Development of orthopaedic surgical robots in China[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1):1-6.

Development of orthopaedic surgical robots in China

TIAN Wei, FAN Mingxing, ZHANG Qi, WU Jiayuan, LI Nan

(Spine Department of Beijing Jishuitan Hospital; Beijing Key Laboratory of Orthopedic Robotics, 100035 Beijing, China)

Abstract: Objective　To discuss the development status of orthopaedic surgical robots in China and prospect the future. Methods　This paper reviews the development history of orthopaedic surgical robots in China since the last 20 years, introduces the development status according to the application of orthopaedic surgical robots in different orthopaedic fields such as spine, joints and trauma, and prospects the future according to the requirements of orthopaedic surgery and also the development characteristics of the robotics industry. Results　As a newly developed medical device, the orthopaedic surgical robot can assist doctors to complete the operation accurately and safely. It is necessary to make continuous improvement in the degree of automation of orthopaedic surgical robots in the future and achieve relative autonomy from functional assistance so as to improve their clinical application. Conclusion　Orthopaedic surgical robots can surpass some of surgical skills of doctors and achieve better clinical results. The future will be a new era of in-depth cooperation between doctors and robots to treat patients' diseases.

Key words: surgical robot; spine; joint; trauma

受经济社会发展、人口老龄化加剧、交通运输规模日益膨胀等多种因素交叉影响，骨科疾病发病率逐年上升，成为影响人类生活的常见、多发病。骨骼肌肉系统解剖结构复杂，是人体最重要、最复杂的运动系统，其周围毗邻重要的血管神经组织，手术风险高。骨科手术机器人采用精准外科理念及技术手段，结合最新生物医学工程研究成果，通过准确、安全、稳定的操作，以较小的损伤，实现精准的手术操作，解决了医生在骨科手术中因视野受限、动作不稳导致的准确性低、并发症发生率高等问题，提高了骨科疾病的治疗效果，已成为骨科发展的重要方向之一[1]。

1　中国骨科手术机器人发展回顾

骨科手术机器人在我国已有 20 余年的发展历史。2002 年，北京积水潭医院田伟团队开始使用主动发射型红外线导航设备开展了脊柱外科三维影像导航辅助下的脊柱椎弓根固定的系列临床研究。建立了正确使用三维导航技术手术规则，同时找到导航隐蔽的可能导致不准确的图像漂移现象和解决办法，为导航在临床的有效应用奠定了关键基础。这是我国最早使用类机器人技术辅助骨科手术研究，同时在国家相关部委支持下，在田伟院士领导下，北京积水潭医院、北京航空航天大学医工联合，以创伤骨科为切入点，开启了我国国产骨科手术机器人研究的先河，研制出一种小型双平面二维图像胫骨髓内钉锁定螺钉辅助固定系统，利用骨科双平面定位技术，试图实现术中靶点的精确定位，解决了锁定螺钉定位困难、术者经验依赖性高及术中频繁透视等瓶颈问题[2]。但是该系统使用的是比较早期的框架计算位置方法，存在需要和肢体固定在一起，没有实时导航能力和机器自主运动能力，只能进行单一胫骨髓内钉锁钉辅助固定功能，临床实用性不强，属于早期探索性质。但是开启了我国自主研发类机器人技术之路，此后，我国骨科手术机器人的研发进入快速发展期。

2010 年，第三军医大学联合中国科学院沈阳自动化所研发了一种脊柱微创手术机器人，该机器人可在术中辅助进行螺钉钻孔操作，减少了术中辐射损伤，医生在对该系统经过一段时间的学习使用后，手术精度可控制在 2 mm 以内[3]。2012 年，香港中文大学威尔士亲王医院和北京航空航天大学研制了 HybriDot 骨科手术机器人，该机器人融合了人机协同操作理念，实现了主被动混合控制，定位精度达到 0.811 mm[4]。2012 年，北京积水潭医院田伟院士团队和深圳先进院开始合作研发红外导航自动机器人系统，2014 年，开发了一款基于力反馈的主被动一

体化脊柱手术机器人，该机器人末端安装有六轴力/力矩传感器，实现了基于力反馈的末端安全操作，动物实验显示该系统的轴位和矢状位螺钉置入精度分别为 0.50 mm 和 0.65 mm，轴位和矢状位的螺钉置入方向偏差分别为 1.90°和 1.48°[5]。2016年，以田伟院长为首席科学家的北京积水潭医院与北京航空航天大学、北京天智航医疗科技股份有限公司团队，经过十几年努力，联合研制出国际首台通用型红外线导航智能骨科机器人-天玑®骨科手术机器人（图 1），实现了具有部分自动运行能力的骨科手术机器人在临床中的亚毫米级操作，性能指标国际领先，改变了骨科手术精度不足、风险高的现状，实现了骨科手术机器人在我国的大规模临床应用，使中国医用机器人研发迈入了国际先进行列[6]。




图 1　天玑®骨科手术机器人

Fig. 1　TIANJI® orthopaedic robot

2　中国骨科手术机器人发展现状

2.1　脊柱手术机器人

Orthbot®脊柱手术机器人（深圳市鑫君特智能医疗器械有限公司）于 2021 年获国家药品监督管理局批准上市，用于脊柱手术导航定位（图 2）。它是由机器人工作站、坐标定位板、跟踪摄像机、末端带自动骨钻的 6 自由度机械臂组成，工作站可进行术前规划、图像获取和配准、机械臂运动计算和监督控制[7]。Orthbot 脊柱手术机器人可通过坐标定位板实现术中无创图像匹配追踪，减少示踪器固定对患者带来的额外创伤。同时，Orthbot 脊柱手术机器人可通过机械臂末端自动磨钻实现导针自动置入，提高了机器人自动化程度。临床研究显示 Orthbot 脊柱手术机器人螺钉置入精度可达 0.70～0.95 mm，螺钉置入优秀率 90.6%，准确率 100%[7-8]。

佐航-300 脊柱外科手术导航定位机器人（苏州铸正机器人有限公司）于 2022 年 3 月获国家药品监督管理局认证，该系统建立了直观图像定位技术，通过无框架立体定位技术和影像融合，实现了脊柱手术机器人在局麻手术中的应用。



图 2　Orthbot 脊柱手术机器人

Fig. 2　Orthbot spinal robot system

在机器人辅助脊柱椎板减压领域，北京大学第三医院设计了一种椎板减压磨削机器人，在离体动物骨骼标本试验中，机器人辅助椎板磨削安全性与徒手组无明显差异，在椎板穿透次数方面，机器人辅助椎板磨削具有显著优势，保障了磨削操作的安全性[9]。针对机器人辅助椎板磨削操作中呼吸运动引起的操作精度变化，中国科学院深圳先进技术研究院提出了一种基于呼吸-脊柱运动模型的补偿控制方法，通过力反馈和机械臂主动模糊程序实现了磨钻与椎板间稳定的接触力，在离体动物骨骼标本试验中保持了操作的安全性，当目标接触力为 2 N 时，力控制误差仅为 0.223 N[10]。

2.2　关节手术机器人

鸿鹄®关节置换手术机器人系统（苏州微创畅行机器人有限公司）于 2022 年 4 月上市（图 3），主要用于膝关节置换术中辅助关节面截骨和假体置入。该机器人系统通过 CT 影像进行术前规划设计，通过机械臂来控制截骨导板定位，减少了传统手术使用股骨髓内定位杆定位导致的髓腔破坏，创伤更小。鸿鹄®关节置换手术机器人系统截骨精度误差为 0.91 mm，在假体安装方面规划角度与实际角度误差小于 1°，术后患肢力线较传统手术组更接近 180°，确保了手术规划的准确实现，提高了手术效果[11-12]。

骨圣元化机器人有限公司研发了一款用于全膝关节置换术的半主动操作型骨科手术机器人[13]。该系统通过机械臂末端控制截骨摆锯姿势及角度，并将摆锯运动限定在截骨平面内，通过主动约束增加了截骨操作的安全性[14]。Hurwa 全膝关节置换手术机器人（北京和华瑞博科技有限公司）通过机

械臂直接夹持动力工具进行截骨操作,并通过截骨边界线提示机制实现软组织保护,实现全膝关节置换截骨精度高、角度准、下肢力线纠正合格率高的目标[15]。ARTHROBOT HIP 全髋关节置换手术机器人(杭州键嘉机器人有限公司)通过安全边界控制功能辅助医生完成髋臼打磨、股骨截骨及假体安装,保证手术定位精度,避免不良事件发生,降低了患者和医生受到的辐射剂量。



图 3　鸿鹄®关节置换手术机器人系统

Fig. 3　HONGHU® robotic system for arthroplasty

2.3　骨折复位手术机器人

骨科手术机器人及髓内固定技术的发展为骨折的微创治疗提供了新思路。2015 年,解放军总医院开发了一种基于 6 自由度 Stewart 平台的长骨复位机器人,该机器人通过三维图像融合技术,以健侧骨骼为参考,通过机器人定位标记球对复位平面进行识别,实现患侧匹配复位,并通过视觉伺服人机交互实现实时监测与安全反馈(图 4)[16]。



图 4　长骨复位机器人

Fig. 4　Robotic system for long bone fracture reduction

研究显示,该机器人复位轴向位移误差为 1.24 mm,侧向位移误差为 1.19 mm,侧方成角为 2.34°,内旋/外旋角度为 2.83°,可以满足临床骨折复位需求[17]。2022 年,北京积水潭医院与北京罗森博特科技有限公司、北京航空航天大学共同设计研发了骨盆骨折复位机器人系统[18-19],该系统包括光学跟踪设备、六自由度机械臂、下肢弹性牵引系统、骨盆夹持设备和骨盆骨折复位软件。该机器人系统基于术中影像,根据健侧半骨盆镜像模板进行伤侧复位位置的自动规划,并联合固定牵引系统,以机械臂结合把持针的运动方式,实现骨盆骨折复位。目前该机器人系统已经开展多中心临床注册研究。

2.4　通用型骨科手术机器人

为解决骨科手术机器人适应证狭窄、仅适用于单个部位、研发成本高等问题,北京积水潭医院与北京航空航天大学、北京天智航医疗科技股份有限公司联合研制了通用型骨科手术机器人系统-天玑®。该系统可以配合不同的末端导向工具、二维/三维影像配准及手术规划模块,实现脊柱全节段[20-22]、舟骨[23]、骨盆[24]、髋臼[25]、股骨颈[26]、股骨转子间[27]、胫骨平台[28]、跟骨[29]等多部位内固定螺钉的准确置入,是目前国内应用最为广泛的骨科手术机器人系统[30]。同时,该系统可以对患者呼吸和手术操作引起的运动进行实时追踪并在机械臂末端进行运动补偿,保障了手术精度[20,22]。天玑®骨科手术机器人在多项随机对照临床研究中表现稳定,螺钉置入优秀率为 87.6% ~95.3%,准确率为 93.6% ~98.7%,显著优于传统徒手骨科手术的螺钉置入准确率[21-22,24,31]。

3　中国骨科手术机器人发展展望

近年来,我国骨科手术机器人行业迅猛发展,涌现出一批代表性的医疗机构、研究院所和生产企业。要继续发挥骨科手术机器人在医学领域中的巨大作用,不断完善骨科手术机器人系统。现阶段的骨科手术机器人多为非自动化或任务自动化系统,未来需要与人工智能技术深度融合,以临床需求为导向,通过数据积累和机器学习,继续提升骨科手术机器人的自动化程度,实现机器人从功能辅助到相对自主,进一步为骨科患者提供优质高效的医疗服务。

基于 5G 技术的实时高带宽和低延迟访问特性,扩展了骨科手术机器人的应用场景,推动了骨科远程医疗的快速发展,变革了现代诊疗理念和手段。2019 年,北京积水潭医院通过 5G 远程手术平台实现一对多骨科手术机器人遥操作,形成 5G + 医疗健康标志性应用[32],实现了远程骨科机器人手术的应用与推广,促进了优质医疗资源下沉、提升了区域医疗服务质量。

未来，通用型、小型化、模块化机器人或将成为骨科手术机器人的发展趋势。灵巧的机器人构型、融合多模影像的智能配准与高效规划、简捷的人机交互、灵敏的智能传感、安全的控制策略将成为骨科手术机器人发展的主要技术方向。但我国骨科手术机器人产业仍处于发展阶段，产业链上游核心零部件(机械臂、导航定位系统、传感器等)部分仍依赖进口，图像重建、空间配准和精准控制等技术的基础研究尚不足，交叉学科的专业人才缺口大。导致我国骨科手术机器人研发及临床应用水平参差不齐，真正获得大规模临床应用的骨科手术机器人品类仍较少，相关临床研究也多为个案报道，尚缺少大规模临床对照研究。未来，要进一步开展骨科手术机器人及其关键零部件研发攻关，突破快速图像配准、高精度定位、智能人机交互、多自由度精准控制等核心关键技术，积极探索医工交叉的人才培养新模式，激发医务人员创新活力，强化知识产权保护，加强临床应用研究，开展大规模临床对照实验。相信在不远的将来，我国骨科手术机器人定会站在世界前列。

骨科手术机器人作为新型高端医疗设备，可以帮助医生更准确、安全的完成手术，并提高治疗效果。但在骨科手术机器人迅猛发展的同时，我们也需要思考机器人技术带来的伦理学问题。特别是当骨科手术机器人将要实现自主操作时，机器人更加需要符合医学伦理学规范。同时，我们要坚持骨科手术机器人技术对医学的正向帮助，而不是追求使用机器人替代医生。骨科手术机器人可以超越医生的部分手术技能，但永远不能替代医生，未来将是医生和机器人深度合作解决患者疾患的新时代。

参考文献：

[1] CHEN A F, KAZARIAN G S, JESSOP G W, et al. Robotic technology in orthopaedic surgery[J]. The journal of bone and joint surgery, 2018, 100(22): 1984-1992.

[2] 王军强，苏永刚，胡磊，等. 医用机器人及计算机辅助导航手术系统在胫骨髓内钉手术中的设计与应用[J]. 中华创伤骨科杂志，2005，7(12)：1108-1113.
WANG Junqiang, SU Yonggang, HU Lei, et al. Robot-assisted and computer-guided intramedullary nailing for tibial fractures: Design and clinical application[J]. Chinese journal of orthopaedic trauma, 2005, 7(12): 1108-1113(in Chinese).

[3] 张鹤，韩建达，周跃. 脊柱微创手术机器人系统辅助打孔的实验研究[J]. 中华创伤骨科杂志，2011，13(12)：1166-1169.
ZHANG He, HAN Jianda, ZHOU Yue. Drilling into cattle spines assisted by a spinal minimally invasive robot system[J]. Chinese journal of orthopaedic trauma, 2011, 13(12): 1166-1169(in Chinese).

[4] KUANG S L, LEUNG K S, WANG T M, et al. A novel passive/active hybrid robot for orthopaedic trauma surgery[J]. The international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2012, 8(4): 458-467.

[5] TIAN W, HAN X G, LIU B, et al. A robot-assisted surgical system using a force-image control method for pedicle screw insertion[J]. PloS one, 2014, 9(1): e86346.

[6] 董瑞一，朱仕文，苏永刚. TiRobot 辅助骨折手术的应用进展[J]. 中华创伤骨科杂志，2022，24(2)：179-184.
DONG Ruiyi, ZHU Shiwen, SU Yonggang. Application progress in TiRobot-assisted fracture surgery[J]. Chinese journal of orthopaedic trauma, 2022, 24(2): 179-184(in Chinese).

[7] LI J Y, HUANG L, ZHOU W Y, et al. Evaluation of a new spinal surgical robotic system of Kirschner wire placement for lumbar fusion: A multi-centre, randomised controlled clinical study[J]. The international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2021, 17(2): e2207.

[8] POJSKIĆ M, BOPP M, NIMSKY C, et al. Initial intraoperative experience with robotic-assisted pedicle screw placement with Cirq® robotic alignment: An evaluation of the first 70 screws[J]. Journal of clinical medicine, 2021, 10(24): 5725.

[9] LI Z F, JIANG S, SONG X K, et al. Collaborative spinal robot system for laminectomy: A preliminary study[J]. Neurosurgical focus, 2022, 52(1): E11.

[10] LI M, QI X Z, SUN Y, et al. A stability and safety control method in robot-assisted decompressive laminectomy considering respiration and deformation of spine[J/OL]. IEEE transactions on automation science and engineering, 2022: 1-13[访问日期]. DOI: 10.1109/TASE.2022.3147270.

[11] 何锐，孙茂淋，熊然，等. 机器人辅助膝关节置换的近期疗效与学习曲线[J]. 陆军军医大学学报，2022，44(5)：476-483.
HE Rui, SUN Maolin, XIONG Ran, et al. Short-term efficacy and learning curve of robot-assisted total knee arthroplasty[J]. Journal of Army Medical University, 2022, 44(5): 476-483(in Chinese).

[12] 夏润之，童志成，张经纬，等. 国产“鸿鹄”膝关节置换手术机器人的早期临床研究[J]. 实用骨科杂志，2021，27(2)：108-113，117.
XIA Runzhi, TONG Zhicheng, ZHANG Jingwei, et al. Early clinical study of domestic “Skywalker” surgical robot for knee arthroplasty[J]. Journal of practical orthopaedics, 2021, 27(2): 108-113, 117(in Chinese).

[13] 柴伟，谢杰，张晓岗，等. 国产全膝关节置换术辅助机器人系统的尸体实验研究[J]. 中国修复重建外科杂志，2021，35(4)：409-413.
CHAI Wei, XIE Jie, ZHANG Xiaogang, et al. A cadaveric experimental study on domestic robot-assisted total knee arthroplasty[J]. Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2021, 35(4): 409-413(in Chinese).

[14] 袁铭成，石小军，苏强，等. 国产机器人辅助人工全膝关节置换

术近期疗效的前瞻性随机对照研究[J]. 中国修复重建外科杂志,2021,35(10):1251-1258.
YUAN Mingcheng, SHI Xiaojun, SU Qiang, et al. A prospective randomized controlled trial on the short-term effectiveness of domestic robot-assisted total knee arthroplasty[J]. Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2021, 35 (10): 1251-1258 (in Chinese).

[15] LI Z, CHEN X, WANG X Q, et al. HURWA robotic-assisted total knee arthroplasty improves component positioning and alignment – a prospective randomized and multicenter study[J]. Journal of orthopaedic translation, 2022, 33:31-40.

[16] DU H L, HU L, LI C S, et al. Advancing computer-assisted orthopaedic surgery using a hexapod device for closed diaphyseal fracture reduction[J]. The international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2015, 11(3):348-359.

[17] TANG P F, HU L, DU H L, et al. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedic surgery system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. The international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2012, 8(1):17-24.

[18] GE Y F, ZHAO C P, WANG Y, et al. Robot-assisted autonomous reduction of a displaced pelvic fracture: A case report and brief literature review[J]. Journal of clinical medicine, 2022, 11(6): 1598.

[19] ZHAO C P, WANG Y, WU X B, et al. Design and evaluation of an intelligent reduction robot system for the minimally invasive reduction in pelvic fractures[J]. Journal of orthopaedic surgery and research, 2022, 17(1):205.

[20] TIAN W. Robot-assisted posterior C1-2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability: A case report[J]. Spine, 2016, 41 (19B):B2-B5.

[21] FAN M X, LIU Y J, HE D, et al. Improved accuracy of cervical spinal surgery with robot-assisted screw insertion: A prospective, randomized, controlled study[J]. Spine, 2020, 45(5):285-291.

[22] HAN X G, TIAN W, LIU Y J, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: A prospective randomized controlled trial [J]. Journal of neurosurgery: Spine spi, 2019, 30(5):615-622.

[23] 方杰,朱辉,郑大伟,等. 机器人导航经皮内固定治疗新鲜无移位的舟骨腰部骨折的疗效分析[J]. 中华创伤骨科杂志,2021,23(11):982-986.
FANG Jie, ZHU Hui, ZHENG Dawei, et al. Treatment of fresh undisplaced scaphoid lumbar fractures with robotic navigation and percutaneous internal fixation[J]. Chinese journal of orthopaedic trauma, 2021, 23(11):982-986(in Chinese).

[24] WANG J Q, WANG Y, FENG Y, et al. Percutaneous sacroiliac screw placement: A prospective randomized comparison of robot-assisted navigation procedures with a conventional technique[J]. Chinese medical journal, 2017, 130(21):2527-2534.

[25] 赵春鹏,肖鸿鹄,汪凯文,等. 骨科机器人辅助髋臼骨折微创手术的临床研究[J]. 中华创伤骨科杂志,2020,22(12):1021-1028.
ZHAO Chunpeng, XIAO Honghu, WANG Kaiwen, et al. Robot-assisted minimally invasive surgery for acetabular fracture[J]. Chinese journal of orthopaedic trauma, 2020, 22(12):1021-1028(in Chinese).

[26] 童祎,罗晓中,吴刚,等. 机器人导航下及传统经皮空心拉力螺钉内固定术治疗股骨颈骨折的疗效比较[J]. 中国修复重建外科杂志,2016,30(6):685-689.
TONG Yi, LUO Xiaozhong, WU Gang, et al. Comparative study on fixation with percutaneous cannulated screws assisted by robot navigation and conventional surgery with manual positioning for femoral neck fractures[J]. Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2016, 30(6):685-689(in Chinese).

[27] LAN H, TAN Z, LI K N, et al. Intramedullary nail fixation assisted by orthopaedic robot navigation for intertrochanteric fractures in elderly patients[J]. Orthopaedic surgery, 2019, 11(2):255-262.

[28] 付雪飞,张诗剑,赵保双,等. 机器人辅助经皮复位微创内固定治疗 Schatzker Ⅱ-Ⅲ型胫骨平台骨折[J]. 中国组织工程研究,2020,24(18):2829-2835.
FU Xuefei, ZHANG Shijian, ZHAO Baoshuang, et al. Robot-assisted percutaneous reduction and minimally invasive internal fixation for treating Schatzker Ⅱ-Ⅲ tibial plateau fracture[J]. Chinese journal of tissue engineering research, 2020, 24(18):2829-2835 (in Chinese).

[29] 袁心伟,张斌,胡豇,等. 机器人辅助下跟骨骨折内固定与传统切开复位内固定对比研究[J]. 中国修复重建外科杂志,2021,35(6):729-733.
YUAN Xinwei, ZHANG Bin, HU Jiang, et al. A comparative study on internal fixation of calcaneal fractures assisted by robot and traditional open reduction internal fixation[J]. Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2021, 35(6):729-733(in Chinese).

[30] HUANG M, TETREAULT T A, VAISHNAV A, et al. The current state of navigation in robotic spine surgery[J]. Annals of translational medicine, 2021, 9(1):86.

[31] ZHANG Q, HAN X G, XU Y F, et al. Robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw placement in transforaminal lumbar interbody fusion for lumbar degenerative disease[J]. World neurosurgery, 2019, 125:e429-e434.

[32] 田伟,张琦,李祖昌,等. 一站对多地 5G 远程控制骨科机器人手术的临床应用[J]. 骨科临床与研究杂志,2019,4(6):349-354.
TIAN Wei, ZHANG Qi, LI Zuchang, et al. Clinical application of "one to many" 5G remote orthopedic robot-assisted surgery[J]. Journal of clinical orthopedics and research, 2019, 4(6):349-354 (in Chinese).

（编辑　黄崇亚　张璐）